第41卷 第12期
2024年12月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 12
Dec. 2024

两种中尺度模式对甘肃河东暴雨日降水预报偏差精细化评估

杨秀梅， 孔祥伟， 沙宏娥， 张君霞

（兰州中心气象台，甘肃 兰州 730020）

摘 要：利用2019—2021年暖季（5—9月）甘肃河东20个暴雨日的小时实况和模式数据，用降水强度、频率等要素进行研究，评估了CMA-SH9、CMA-MESO模式在4个子区（甘南高原、陇南、陇东和陇中）的降水日变化预报偏差。结果表明：（1）两种模式在陇南、陇东、甘南高原对≥2.5 mm·h^{-1}和≥5 mm·h^{-1}降水预报能力相当，但在陇中CMA-MESO对≥5 mm·h^{-1}的降水比CMA-SH9更易空报。（2）对≥2.5 mm·h^{-1}降水强度两种模式预报白天偏大，夜间偏小，夜间实况峰值时段偏差最大，陇中、陇东CMA-SH9降水强度预报在大多数时次优于CMA-MESO，陇南夜间CMA-SH9优于CMA-MESO，白天反之；陇南和陇东（甘南高原）CMA-SH9对≥5 mm·h^{-1}降水强度预报整体优于（劣于）CMA-MESO。（3）对≥2.5 mm·h^{-1}降水频率两种模式预报白天偏低，夜间偏高，夜间实况峰值时段偏差最大，CMA-SH9降水频率预报整体优于CMA-MESO；在陇南、陇中和陇东各时次对≥5 mm·h^{-1}降水频率预报偏低，实况峰值时段偏低更明显。（4）在4个子区内两种模式均以位相误差为主，振幅误差小。

关键词：小时降水；日变化；降水强度和频率；偏差特征

随着气象科技进步，数值天气预报准确性大幅提升，高分辨率数值预报产品已成为气象工作者进行精细化天气预报的有效手段。但由于数值预报结果受初值场、边界条件及物理过程等因素影响，模式对降水预报在量级大小、出现时间及范围存在一定误差[1]。对数值预报产品进行检验、评估是帮助预报员选择可信度高和正确使用各种数值模式产品的有效手段。因此，检验数值模式产品的预报偏差，认识预报误差时空分布对提高预报准确率至关重要[2]。

甘肃地处青藏高原、黄土高原和内蒙古高原的交汇地带，地形地貌和气候类型多样，在汛期受东亚季风影响易产生短时强降水和暴雨等强天气，降水局部差异大、变化复杂[3-4]。空间分布上，甘肃暴雨量、暴雨日数和短时强降水频次从西向东逐渐增大[5-6]。降水日循环方面，甘肃强降水主要出现在傍晚至午夜（最大雨强峰值时间同）[7-10]，同时，日变化有明显区域差异[10]。降水日循环历来是降水规律研究的重要方面[11]，对工农业生产影响最为直接[12-13]，数值模式对降水日变化的预报能力已成为衡量模式预报性能的重要指标[14]，反映模式对天气系统和局地环流多尺度相互作用的描述能力[15]。通过对降水日变化的研究可深入理解触发降水的物理机理，同时可为提高数值模式预报性能建立有效的客观依据[16-17]。在复杂地形区数值模式对降水预报偏差大于平原地区，因此，探究复杂地形区数值模式的降水预报性能成为模式评估的重要方面。叶茂等[18]发现四川盆地CMA-SH9模式预报的降水日变化峰值时间滞后；钟琦等[15]研究表明，CMA-MESO模式对京津冀夏季降水预报存在不同程度的高频次、低强度偏差现象。目前，在甘肃地区，数值模式降水检验评估也取得一定成果，但大多针对24 h累计降水的预报偏差评估，对降水日循环偏差的研究很少，比如孔祥伟等[19]利用CRA（Contiguous Rain Area）空间检验方法开展了ECMWF和CMA-GFS数值模式24 h强降水预报的空间偏差评估；吴晶等[20]研究了CMA-MESO模式24 h累计降水的TS评分等；陈晓燕等[21]评估了CMA-SH9和CMA-MESO模式在不同类型天气过程

收稿日期：2024-02-27； **修订日期**：2024-09-23

基金项目：甘肃省青年科技基金计划（22JR5RA751，23JRRA1328）；中国气象局创新发展专项（CXFZ2023J068）；甘肃省气象局创新团队项目（GSQXCXTD-2024-01）

作者简介：杨秀梅（1990-），女，工程师，主要从事短期天气预测和研究. E-mail: yangxm15@lzu.edu.cn

通讯作者：孔祥伟. E-mail: xiangwei580@163.com

中24 h累计降水的偏差特征。

目前，针对中尺度数值模式在甘肃的降水误差评估多关注24 h累计降水，对降水日变化预报性能的评估很少，亟须对高分辨率业务中尺度模式的降水日变化预报性能进行精细化评估。比如：中尺度数值模式能否合理反映甘肃复杂地形下暴雨期间降水精细化观测特征？模式对降水日内尺度的基本特征把握如何？文中拟从降水量、降水强度和降水频率等要素入手，围绕上述问题，针对中尺度模式在甘肃复杂地形下不同区域的降水预报性能和偏差进行评估，以认识中尺度模式在甘肃不同区域降水预报偏差的基本特征和日内尺度特征，以期为暴雨预报订正的方向和幅度提供量化指导。

1 资料与方法

1.1 观测数据

采用的观测数据为2019—2021年暖季（5—9月）甘肃自动气象观测站整点小时降水数据，并通过中国气象局质控和人工判识。质控包括台站极值检验、气候阈值检验及内部一致性检验等，人工判识方法是从降水数据中提取小时降水≥50 mm的降水数据与兰州中心气象台灾害性天气个例库中的区域性暴雨个例进行对比分析，通过分析降水实况和形势场，再次剔除部分异常值。经过质控，最终筛选出2289个自动站（国家基准站、基本站、一般站）小时降水观测数据。

研究对象为区域性暴雨，为此挑选出区域性暴雨个例进行分析。具体判别标准为：河东地区5—9月25个及以上自动站出现暴雨（08:00至次日08:00降水量≥50 mm），根据上述标准，2019—2021年5—9月发生在甘肃河东的区域性暴雨过程共计20个，具体信息见表1。

1.2 数值模式资料

中尺度数值模式考虑了业务常用、模式分辨率与预报性能等的代表性，选取中国气象局上海数值预报模式系统（CMA-SH9）预报的小时降水数据，水平分辨率9 km，时间分辨率1 h；中国气象局中尺度数值天气预报系统（CMA-MESO）的小时降水数据，水平分辨率3 km，时间分辨率1 h。由于挑选区域性暴雨过程按照08:00至次日08:00确定，考虑预报数据的可用时效和一致性，前一日20:00是最近的起报时间，因此，数值预报产品均为2019—2021年区域性暴雨个例中（表1）20:00起报的时效为12~36 h的小时降水产品，由此形成与观测（08:00至次日08:00）对应的降水量预报数据。

1.3 方法

1.3.1 *站点临近匹配方法* 在进行检验时，先采用站点临近匹配方法将两种数值模式的格点降水数据插值到2289个自动站，然后与站点实况降水数据进行点对点检验。在高分辨率特别是复杂地形情况下，此方法更合理，可避免插值过程对气象要素特别是降水这类非连续变量带来的较大误差。

1.3.2 *预报误差评估方法* 误差检验分析中除用到TS评分、平均相对误差（ME）、预报偏差（Bias），还采用Lange[22]给出的均方根误差（RMSE）与平均偏差（BIAS）和误差标准偏差（SDE，反映误差的随机性）的关系，讨论模式系统误差和随机误差的相对大小。具体公式如下：

表1 2019—2021年5—9月甘肃河东区域性暴雨个例

Tab. 1 Cases of regional rainstorms in the Hedong Region of Gansu Province from May to September 2019 to 2021

暴雨发生时间	日最大降水量	暴雨发生时间	日最大降水量
2019年7月21日	136.3 mm（合水刘家庄）	2020年7月24日	144.3 mm（文县中庙）
2019年8月2日	124.2 mm（西峰彭原）	2020年8月10日	116.4 mm（宕昌哈达铺）
2019年8月19日	92.9 mm（岷县西江牛坝）	2020年8月12日	89.1 mm（成县毕河）
2019年8月20日	101.6 mm（天水长河）	2020年8月15日	119.7 mm（文县马家沟）
2019年8月26日	85.1 mm（镇原临泾）	2020年8月16日	129.1 mm（文县碧口）
2019年9月12日	104.6 mm（文县口头坝）	2020年8月23日	73.1 mm（西和马元）
2020年6月15日	68.8 mm（成县厂坝矿区）	2021年7月14日	168.3 mm（礼县湫山）
2020年6月25日	132.1 mm（静宁威戎）	2021年7月25日	103.4 mm（和政牙塘水库）
2020年7月10日	126.1 mm（康县两河）	2021年8月18日	189.9 mm（镇原闫沟）
2020年7月17日	60.6 mm（泾川樊家）	2021年9月25日	168.2 mm（康县阳坝）

$$TS = N_A/(N_A + N_B + N_C) \quad (1)$$

$$Bias = (N_A + N_B)/(N_A + N_C) \quad (2)$$

式中：N_A、N_B、N_C分别为降水预报正确、空报和漏报的站次数。TS评分反映数值模式预报的准确程度，其值越大数值模式预报降水能力越强；Bias最佳为1，Bias>1表示数值模式预报有偏强倾向，Bias<1表示有偏弱倾向。

$$RMSE^2 = BIAS^2 + SDE^2 = BIAS^2 + SDE1^2 + SDE2^2 \quad (3)$$

$$BIAS = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(F_i - O_i) \quad (4)$$

$$模式标准差：\sigma_f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(F_i - \bar{F})^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$实况标准差：\sigma_o = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$SDE1 = \sigma_f - \sigma_o \quad (7)$$

$$SDE2 = \sqrt{(RMSE^2 - BIAS^2 - SDE1^2)} \quad (8)$$

式中：F_i为模式预报降水量；O_i为观测降水量；$\bar{F}$为模式预报降水量的平均值；$\bar{O}$为观测降水量的平均值；SDE由振幅偏差（SDE1）和位相偏差（SDE2）两部分组成。SDE1为模式预报值与观测值的标准差之差，均方根误差（RMSE）和平均偏差（BIAS）均可算出，SDE2通过式（1）的其他项计算导出，详见式（8）。

其中，SDE是误差标准差，反映误差的随机性；SDE1是对降水强弱偏差的衡量，表示观测和预报降水强度之间的差异，振幅偏差的绝对值越小，说明预报的降水强度越接近观测值；SDE2是衡量观测和预报降水发生时间差异的物理量，位相偏差的值越小，表示预报的降水发生时间与观测值越接近；BIAS代表系统性的平均偏差，常用于数值预报的准确性评估，而Bias主要侧重于模式预报分类问题的性能评估。

参考Zhou等[23]将小时降水量≥0.1 mm判定为有降水发生，计算2019—2021年5—9月降水的小时平均降水量、降水频率和降水强度。计算公式为：

$$小时平均降水量PA = 总降水量/总时数 \quad (9)$$

$$降水频率PF = （总降水时数/总时数）\times 100\% \quad (10)$$

$$降水强度PI = 总降水量/总降水时数 = 降水量/降水频率 \quad (11)$$

式中：总时数是所有日数×24，总降水时数是小时降水≥0.1 mm·h^{-1}的累计小时数，不管是间歇性还是持续性降水，只要出现≥0.1 mm·h^{-1}降水就累计一次小时数。

2 小时降水实况特征

甘肃小时降水空间分布差异大，计算2019—2021年5—9月不同量级小时降水的平均降水量、降水频率和降水强度空间分布（图1），≥2.5 mm·h^{-1}平均降水量、降水频率从陇南市向甘肃河西递减，陇南市小时平均降水量最大，超过0.06 mm·h^{-1}，甘肃河西大部分地方小时平均降水量极小，普遍<0.03 mm·h^{-1}，干旱特征明显。兰州、白银市以南降水强度超过4.5 mm·h^{-1}，陇南市南部、天水市南部、庆阳市中部超过5.5 mm·h^{-1}，甘肃河西降水强度<4.5 mm·h^{-1}。兰州、白银市以南降水频率超过0.6%，甘南州南部、陇南、天水、平凉、庆阳市南部超过1.2%，甘肃河西大部分地方降水频率低于0.6%。

2019—2021年5—9月≥5 mm·h^{-1}的平均降水量、降水强度、降水频率分布图中，小时平均降水量和降水频率在陇南市东南部最大，逐渐向甘肃河西递减，虽然，甘肃河西出现≥5 mm·h^{-1}的降水频率很低，但降水强度不低于甘肃河东，这也是甘肃河西洪涝危害程度不亚于我国其他同纬度地区的原因。≥10 mm·h^{-1}的平均降水量在除了陇南市南部边缘空间平均>0.03 mm·h^{-1}，其余地方<0.03 mm·h^{-1}，降水频率和小时平均降水量空间分布相似，南北差异不大，降水强度在甘肃河东略大于甘肃河西。

在分析甘肃河东暴雨期小时降水的特征前，首先给出甘肃5—9月小时降水的总体特征，发现甘肃河西降水频次很低，暴雨出现频次更低，同时甘肃河西、河东小时平均降水量、降水频率、降水强度存在明显的量级差异，因此，本文在评估暴雨期间中尺度模式对小时降水的预报性能时以甘肃河东为研究区域展开。在分量级评估甘肃河东小时降水的偏差时，本文参考了张宏芳等[16]对小时降水强度的分级标准0~10 mm·h^{-1}、10~20 mm·h^{-1}、≥20 mm·h^{-1}，评估发现甘肃河东小时平均降水量、降水频率、降水强度在空间上差异很小，因此，用0~2.5 mm·h^{-1}、2.5~10 mm·h^{-1}、≥10 mm·h^{-1}这种本地化的分级方法评估中尺度模式对小时降水的预报性能。另外，甘肃河东小时降水以小量级（0~2.5 mm·h^{-1}）为主，≥10 mm·h^{-1}的降水频率极低（降水频率几乎都在0.15%以内），下文仅评估两种

图1　观测小时平均降水量、降水强度、降水频率的空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of observed hourly rainfall amount, rainfall intensity and rainfall frequency

中尺度模式在暴雨日对≥2.5 mm·h^{-1}和≥5 mm·h^{-1}量级降水日循环的预报性能。

甘肃河东地处青藏高原边坡地带,是暴雨的多发区,同时暴雨的发生、发展有一定特殊性和复杂性,结合研究区域内主体地貌和降水特征的空间差异,进一步将该区划分为4个子区(图2),分别对应甘南高原(子区A,33.0°~35.0°N,100.7°E~104.0°E)、陇南(子区B,32.5°N~35.0°N,104.1°E~106.5°E)、陇东(子区C,34.9°N~37.4°N,106.5°E~108.8°E)和陇中(子区D,35.0°N~37.2°N,102.0°E~106.5°E)。其中子区A位于青藏高原的东北边缘,地形复杂多样,属

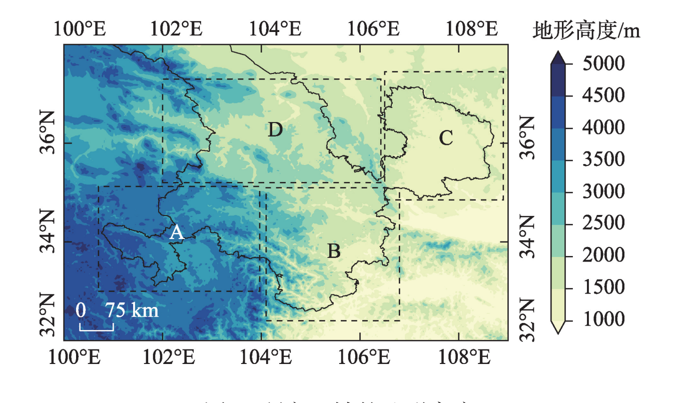


图2　研究区域的地形高度

Fig.2　Terrain elevation in the study region

于高原高山气候，天气复杂多变；子区B地处秦巴山区、黄土高原、青藏高原的交汇区域，形成了高山峻岭与峡谷盆地相间的复杂地形，气候属北亚热带向暖温带的过渡带，为甘肃降水最多地区；子区C地形以塬、沟、梁、峁为主，属于温带湿润气候，四季分明；子区D以山地和高原为主，地形起伏大，属于温带大陆性气候，降水量时空分布不均。

3 小时降水评估

3.1 空间分布

TS评分是评估模式降水预报水平的标准之一，TS评分越接近1代表预报效果越好。由图3和图4可知，CMA-MESO和CMA-SH9预报≥2.5 mm·h^{-1}降水TS评分空间分布不均匀，在0.05~0.3之间，CMA-MESO预报≥2.5 mm·h^{-1}降水TS评分在陇南、陇东>0.15，Bias平均值在1附近，其在陇南、陇东对≥2.5 mm·h^{-1}降水有较好的预报能力，陇中CMA-MESO的TS评分<0.10，Bias普遍>2.4，CMA-MESO预报≥2.5 mm·h^{-1}降水空报偏多；CMA-SH9在陇南、陇东TS评分>0.10，Bias普遍在1附近，其余地区TS评分均很小，陇中以空报为主。

对于≥5 mm·h^{-1}降水（图略），两种模式TS评分显著降低，均<0.15，CMA-MESO在陇中的TS评分略大于CMA-SH9，其余地方两种模式TS评分接近，落在0.05~0.15；陇中CMA-MESO预报≥5 mm·h^{-1}降水站次中Bias>1.2的占比达81%（表2），CMA-SH9占比为63%，CMA-MESO比CMA-SH9易出现空报，CMA-SH9预报≥5 mm·h^{-1}降水站次中Bias<0.8占比为28%，CMA-MESO为6%，CMA-SH9比CMA-MESO更易出现漏报，在其余地区两种模式均有不同程度漏报。

因此，在暴雨日甘南高原、陇南、陇东CMA-MESO和CMA-SH9对≥2.5 mm·h^{-1}降水预报能力大于≥5 mm·h^{-1}，对≥5 mm·h^{-1}降水预报比≥2.5 mm·h^{-1}

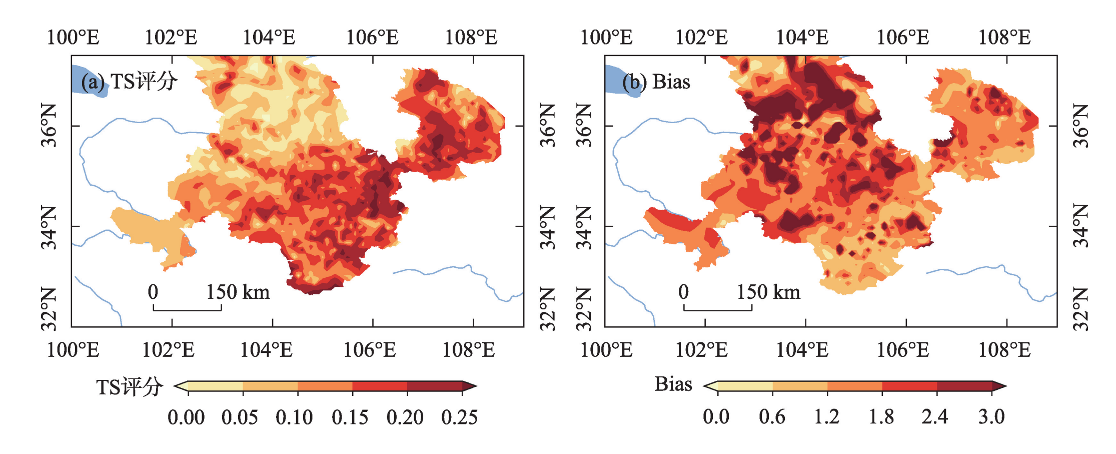


图3 CMA-MESO预报≥2.5 mm·h^{-1}降水的TS评分及Bias

Fig. 3 Spatial distribution of TS score and Bias for the ≥2.5 mm·h^{-1} rainfall predicted by CMA-MESO

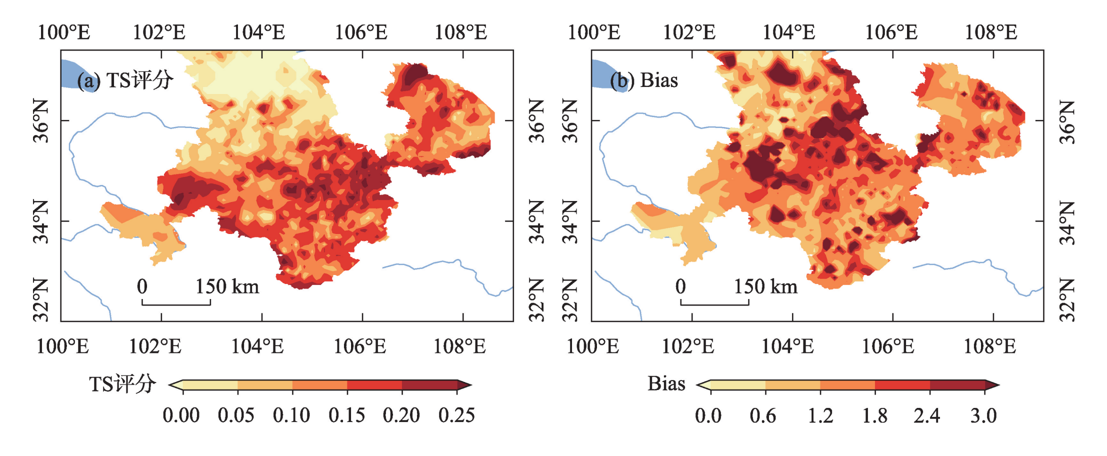


图4 CMA-SH9预报≥2.5 mm·h^{-1}降水的TS评分及Bias

Fig. 4 Spatial distribution of TS score and Bias for the ≥2.5 mm·h^{-1} rainfall predicted by CMA-SH9

表2 两种模式预报≥5 mm·h⁻¹降水的Bias在陇中不同区间的站次数占比

Tab. 2 Proportion of Bias from ≥5 mm·h⁻¹ precipitation in different intervals of the two models in the Longzhong

	Bias≥1.2	Bias≤0.8	0.8<Bias<1.2
CMA-SH9	63%	28%	9%
CMA-MESO	81%	6%	13%

易空报;CMA-MESO对≥5 mm·h⁻¹较强降水比CMA-SH9更易空报,CMA-SH9比CMA-MESO更易漏报,陇中暴雨频次低,预报难度大,准确率低。

在暴雨日两种模式预报≥2.5 mm·h⁻¹降水的TS评分及预报偏差Bias的日变化特征如图5和图6所示,两种模式预报≥2.5 mm·h⁻¹降水的TS评分主要落在0.1~0.4,08:00—13:00 4个子区CMA-MESO的TS评分大于CMA-SH9,Bias在1~2之间,均以空报为主,因此,此时段CMA-MESO对小时降水预报有更大指示意义。15:00—23:00陇东、陇南和陇中CMA-SH9的TS评分大于CMA-MESO,且CMA-SH9的Bias接近1,CMA-MESO的Bias接近2,以空报为主,此时段陇东、陇南、陇中小时降水预报参考CMA-SH9更有效。23:00至次日07:00,陇南CMA-MESO预报小时降水的TS大于CMA-SH9,CMA-MESO的Bias小于CMA-SH9,更接近1,CMA-SH9以空报为主。4个子区CMA-MESO≥5 mm·h⁻¹降水的TS评分和Bias存在日变化(图略),上午TS评分大于下午和晚上,多数时间以空报为主,其中17:00—20:00和04:00—07:00空报最多,陇中最明显,CMA-SH9≥5 mm·h⁻¹的TS评分无明显日变化,傍晚到夜间存在明显空报(Bias>1.5),陇中和陇东最明显。在甘南高原CMA-MESO对小时降水预报的Bias在午后偏大明显,TS为0,CMA-MESO在量级上高估了小时降水,但该模式预报的降水区域和实况降水区域没有重合,导致TS为0,Bias偏大明显;CMA-SH9在01:00—03:00 TS<0.25,此时Bias>2,空报明显多于漏报,04:00—06:00 TS明显增大,落在0.2~0.5,Bias明显减小,在1附近,预报效果较好。

因此,在暴雨日4个子区对于≥2.5 mm·h⁻¹降水在08:00—13:00 CMA-MESO优于CMA-SH9,15:00—23:00陇东、陇南和陇中CMA-SH9略优于CMA-MESO,其余时段两种模式预报性能差别不大,对于≥5 mm·h⁻¹降水,两种模式日变化预报性能差异不大。

3.2 小时降水平均相对误差空间分布

统计CMA-MESO、CMA-SH9模式预报小时降水的平均相对误差,结果如图7所示,CMA-MESO在定

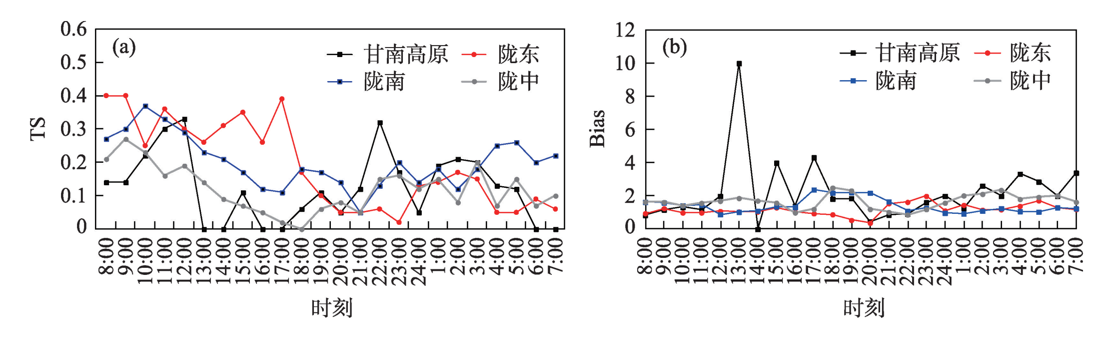


图5 CMA-MESO预报≥2.5 mm·h⁻¹降水的TS评分及Bias日变化

Fig. 5 Diurnal variations of TS score and Bias for the ≥2.5 mm·h⁻¹ rainfall predicted by CMA-MESO

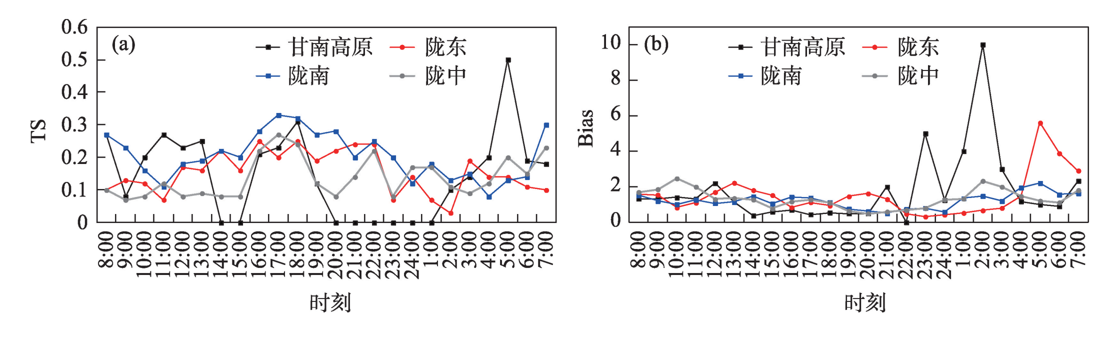


图6 CMA-SH9预报≥2.5 mm·h⁻¹降水的TS评分及Bias日变化

Fig. 6 Diurnal variations of TS score and Bias for the ≥2.5 mm·h⁻¹ rainfall predicted by CMA-SH9

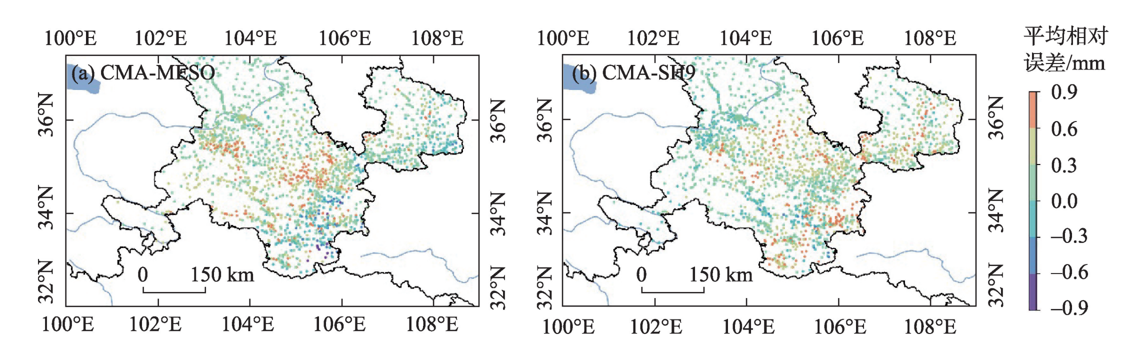


图7 CMA-MESO、CMA-SH9预报小时降水的平均相对误差(ME)空间分布(预报-实况)

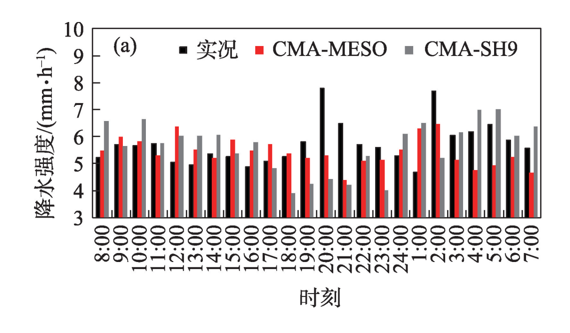
Fig. 7 Spatial distribution of mean relative error (ME) of hourly rainfall forecast by CMA-MESO and CMA-SH9 (forecast-observation)

西市、临夏、甘南州东南部预报小时降水的平均相对误差为正,模式预报明显偏大,最大平均相对误差>0.9 mm,陇南市中南部、天水市中南部预报偏小,最大平均相对误差<−0.9 mm;CMA-SH9在定西、天水市东南部、陇南市南部、庆阳市中部平均相对误差为正偏差,在兰州、白银市、临夏州平均相对误差为负偏差。

3.3 小时降水频率与强度的评估

综上所述,平均相对误差的分析从空间角度反映两种模式的预报性能,这还不能完全反映两种中尺度模式的预报性能差异,为了更全面地分析模式预报效果,还需要综合分析模式偏差的日变化特征。

下面讨论中尺度模式在不同子区的降水日循环预报效果偏差是否存在相似规律或差异,图8~图11给出4个子区的降水强度、频率日变化特征。对比暴雨日小时降水强度和降水频率日变化特征,陇南≥2.5 mm·h^{-1}实况降水强度呈双峰型,一个峰值在20:00左右(第一峰值),另一个峰值在02:00(第二峰值),两种模式对陇南≥2.5 mm·h^{-1}降水强度日循环双峰特征的描述存在偏差,CMA-SH9降水强度第二峰值预报比观测晚3~4 h,CMA-MESO预报的第二峰值时间和观测基本一致,两种模式均未预报出第一峰值,且数值模式预报降水强度在白天整体为正偏差,预报降水强度日循环存在虚假谷值(21:00左右)。陇南≥2.5 mm·h^{-1}实况降水频率日循环为单峰特征,两种模式对陇南降水频率日循环的单峰特征描述是准确的,CMA-MESO预报谷值偏早2~3 h,CMA-SH9预报降水频率谷值和实况一致,两种模式对08:00—22:00降水频率描述基本无偏差,凌晨降水频率预报偏大。因此,在陇南08:00—23:00 CMA-MESO预报降水强度和降水频率与实况更接近,偏差小于CMA-SH9,00:00—07:00 CMA-SH9预报降水强度和频率的偏差小于CMA-MESO,即陇南不同时段可参考不同模式预报的降水。分析陇南≥5 mm·h^{-1}的降水强度和频率分布图(图略),CMA-MESO降水强度预报整体偏弱,CMA-SH9对傍晚降水峰值出现时间和强度把握优于CMA-MESO,其余时段CMA-MESO优于CMA-SH9,整体而言,两种模式对降水频率预报偏高。



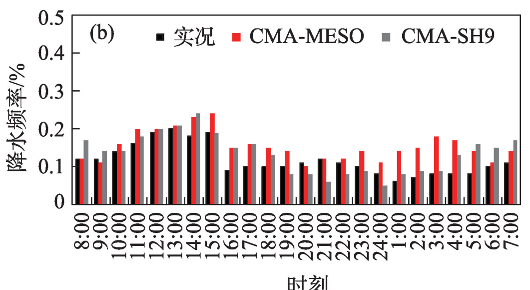


图8 陇南CMA-MESO、CMA-SH9预报≥2.5 mm·h^{-1}降水强度和降水频率对比

Fig. 8 Averaged diurnal cycles of rainfall intensity and frequency from rainfall ≥2.5 mm·h^{-1} predicted by CMA-MESO and CMA-SH9 in the Longnan

陇东≥2.5 mm·h⁻¹的实况降水强度为三峰型,两种模式也为三峰型日变化特征,整体来看,CMA-SH9预报降水强度偏差较小,CMA-MESO存在明显负偏差,两种模式对陇东≥2.5 mm·h⁻¹降水频率双峰特征的日变化特征描述是准确的,09:00—21:00两种模式预报降水频率偏差均较小,04:00—08:00存在明显正偏差。陇东≥5 mm·h⁻¹降水(图略),17:00—03:00两种模式降水强度预报存在不同程度负偏差,04:00—05:00 CMA-SH9预报降水强度偏大,CMA-MESO预报偏小;08:00—17:00 CMA-SH9预报降水频率整体偏大,20:00—07:00 CMA-MESO预报降水频率偏高,CMA-SH9预报与实况接近。

两种中尺度模式对陇中≥2.5 mm·h⁻¹降水强度日循环的单峰特征描述是准确的,08:00—20:00 CMA-MESO对降水强度预报存在正偏差,21:00—07:00为负偏差,白天CMA-SH9预报降水强度正偏差大于CMA-MESO,夜间小于CMA-MESO;白天两种模式预报降水频率均高于实况,CMA-MESO偏高更明显,夜间和实况基本一致。在陇中对于≥5 mm·h⁻¹降水(图略),两种模式均对13:00—16:00和01:00—04:00降水强度峰值预报偏弱,峰值出现时间滞后,对降水频率预报整体偏大,CMA-MESO偏大更明显。

甘南高原≥2.5 mm·h⁻¹实况降水强度日循环规律和两种模式预报的日循环特征相似,均呈三峰结构,08:00—19:00 CMA-SH9与实况偏差较小,CMA-MESO偏差较大,01:00—04:00 CMA-MESO对降水强度峰值预报与实况更接近,CMA-SH9降水峰值强度预报偏弱;08:00—03:00两种模式均存在降水频率偏大现象,其余时次与实况接近。对于≥5 mm·h⁻¹降水(图略),CMA-MESO对降水强度预报整体优于CMA-SH9,CMA-MESO对16:00—19:00降水强度峰值和峰值时间预报与实况基本吻合,CMA-SH9对降水强度预报偏弱,峰值出现时间滞后,整体而言,CMA-SH9降水频率预报略优于CMA-MESO。

4个子区两种模式预报小时降水的平均均方根误差如图12所示,CMA-MESO预报小时降水的均方根误差在陇南最大(2.62 mm),陇东次之(2.40 mm),陇中最小(1.91 mm),CMA-SH9均方根误差从大到小为:陇东(2.71 mm)、陇南(2.32 mm)、甘南高原(2.28 mm)、陇中(0.43 mm)。表明两种模式预报小

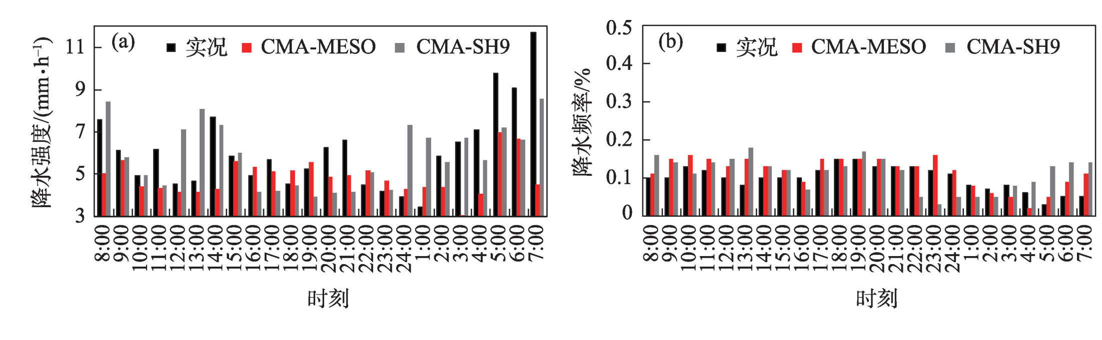


图9 陇东CMA-MESO、CMA-SH9预报≥2.5 mm·h⁻¹降水强度和降水频率对比

Fig. 9 Averaged diurnal cycles of hourly rainfall intensity and frequency from rainfall ≥2.5 mm·h⁻¹ predicted by CMA-MESO and CMA-SH9 in the Longdong

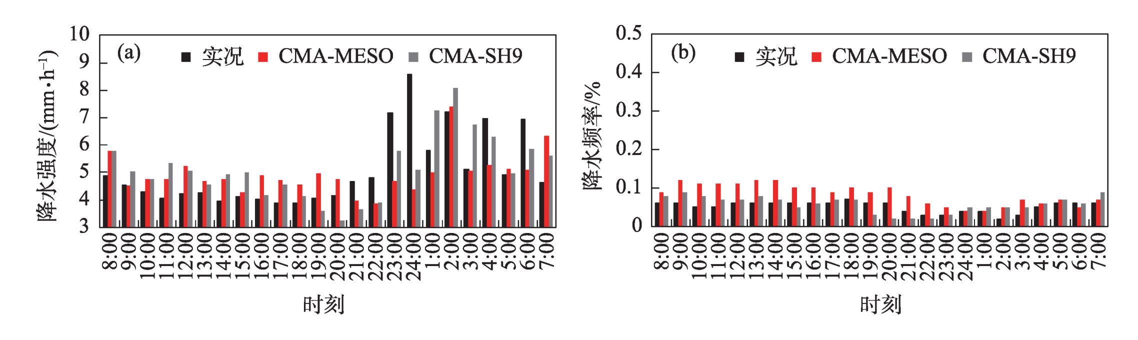


图10 陇中CMA-MESO、CMA-SH9预报≥2.5 mm·h⁻¹降水强度和降水频率对比

Fig. 10 Averaged diurnal cycles of hourly rainfall intensity and frequency from rainfall ≥2.5 mm·h⁻¹ predicted by CMA-MESO and CMA-SH9 in the Longzhong

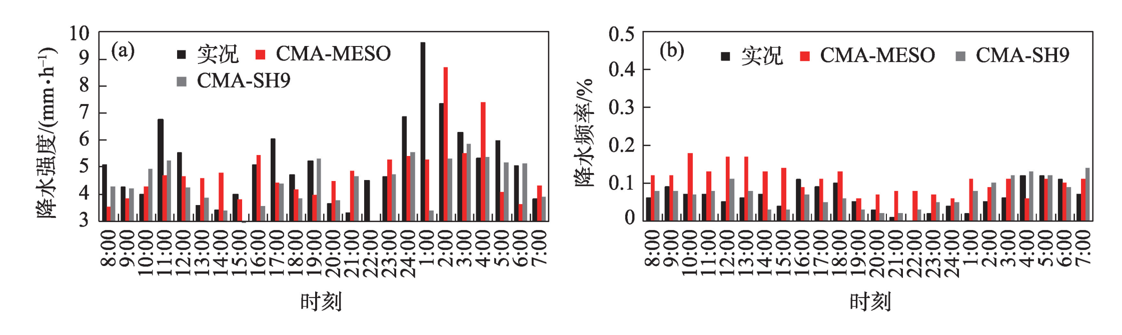


图11 甘南高原CMA-MESO、CMA-SH9预报≥2.5 mm·h⁻¹降水强度和降水频率对比

Fig. 11 Averaged diurnal cycles of rainfall intensity and frequency from hourly rainfall ≥2.5 mm·h⁻¹ predicted by CMA-MESO and CMA-SH9 in the Gannan Plateau

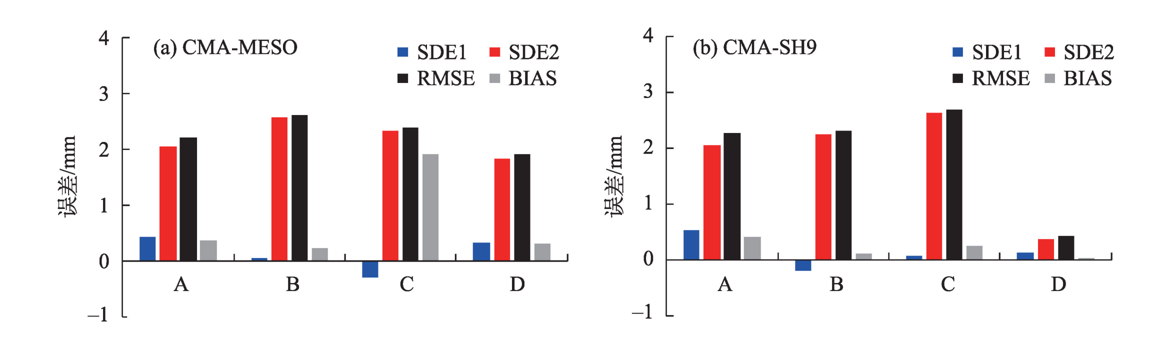


图12 2018—2021年4个子区CMA-MESO和CMA-SH9模式预报小时平均降水量的均方根误差及其分解量

Fig. 12 Root mean square error and decompositions of hourly rainfall forecast by CMA-MESO and CMA-SH9 model in four subregions from 2018 to 2021

时降水的稳定性在4个子区存在差异，陇中和甘南高原好于陇南和陇东，且CMA-SH9在陇中预报稳定性优于CMA-MESO。

在数值预报产品业务应用中，系统性偏差可通过经验和技术方法加以订正，而随机误差订正难度大，尤其是位相误差缺乏有效订正方法。研究区域内中尺度模式预报的甘肃暴雨日小时平均降水量存在系统性偏大（系统偏差为正）现象，CMA-MESO预报小时降水的系统偏差（BIAS）在陇东、陇中、陇南和甘南高原依次减小，CMA-SH9在甘南高原、陇东、陇南、陇中依次减小。那么，两种模式小时降水预报误差的随机误差占比多少、在不同地貌区有无差异？为讨论这个问题，利用式(3)将误差标准偏差（SDE）分解为振幅偏差（SDE1）和位相偏差（SDE2），计算各分量在均方根误差中的占比。由图12 a分析可见，CMA-MESO在陇南、陇中和甘南高原降水预报均方根误差相对较大，以位相偏差为主，系统性偏差占比最小，模式预报偏差不易得到有效订正，陇东振幅偏差和位相误差相当，模式订正时需两方面均考虑，CMA-SH9在4个子区均以位相误差为主，误差订正难度较大。在数值模式降水预报产品应用中，应注意不同模式误差在不同子区的特点（图12b）。

4 结论与讨论

本文利用2019—2021年暖季（5—9月）20个暴雨日CMA-SH9、CMA-MESO模式预报的小时降水数据和对应观测资料，对甘肃河东4个子区小时尺度降水的精细化特征展开评估，主要结论如下：

（1）≥2.5 mm·h⁻¹和≥5 mm·h⁻¹小时平均降水量、降水频率从陇南市向甘肃河西递减，≥2.5 mm·h⁻¹降水强度为相似分布，但≥5 mm·h⁻¹降水强度甘肃河东、河西无明显差异。

（2）CMA-MESO和CMA-SH9模式预报性能方面，陇中CMA-MESO对≥5 mm·h⁻¹降水比CMA-SH9易空报，Bias≥1.2站次占比分别为81%和63%，CMA-SH9比CMA-MESO易漏报，Bias≤0.8站次占比分别为28%和6%；≥2.5 mm·h⁻¹降水，上午4个子区CMA-MESO优于CMA-SH9，下午至夜间陇东、陇南和陇中CMA-SH9略优于CMA-MESO，其余时段两种

模式预报性能差别不大,≥5 mm·h^{-1}降水两种模式差异不大。

(3) 4个子区不同量级降水强度和频率误差不同。≥2.5 mm·h^{-1}降水,陇南两种模式降水强度白天偏强,夜间偏弱,降水频率为正偏差;陇东CMA-SH9降水强度偏弱,夜间降水强度峰值提前,CMA-MESO降水强度偏弱,两种模式降水频率夜间和早晨偏强;陇中两种模式降水强度白天偏强、夜间偏弱、峰值滞后,白天高频;甘南高原两种模式降水强度偏弱、峰值滞后,白天高频。≥5 mm·h^{-1}降水,陇南和陇东两种模式降水频率偏低,强度峰值时段偏弱,CMA-SH9优于CMA-MESO;陇中两种模式降水频率偏低,实况峰值时段降水强度偏弱;陇南和陇东(甘南高原)CMA-SH9降水强度优于(劣于)CMA-MESO,甘南高原CMA-MESO总体优于CMA-SH9。

(4) 两种模式在陇南、陇中和甘南高原以位相误差为主,陇东CMA-MESO系统误差和位相误差相当,CMA-SH9以位相误差为主,两种模式在4个子区振幅误差较小,订正难度较大。

基于CMA-SH9和CMA-MESO小时降水误差时空分析,预报员可根据两种模式在不同子区和时段的预报性能进行相应调整:例如对≥5 mm·h^{-1}降水,在陇中CMA-MESO空报率高于CMA-SH9,降水落区预报可参考CMA-SH9预报产品进行调整;在实况峰值时段,CMA-SH9和CMA-MESO对小时降水强度预报普遍偏弱,预报员可根据模式形势场预报和其他模式产品适当调整小时降水强度。

本研究所用资料年份有限,检验结果不能完全准确地反映两种中尺度模式对暴雨日小时降水预报的准确性及偏差;另外,两种中尺度模式在甘肃河东4个子区不同类型暴雨天气过程中的预报性能存在差异(图略),其可能原因如下:一方面由于CMA-MESO和CMA-SH9水平分辨率不同(CMA-SH9水平分辨率9 km,CMA-MESO为3 km),对天气系统的捕捉能力不同,虽然,CMA-SH9水平分辨率低于CMA-MESO,但在陇中大多数时段CMA-SH9的预报效果要优于CMA_MESO。另一方面,不同模式物理过程参数化方案的差异会导致模式对降水强度和时空分布的预报存在差异[24],此外,甘南高原地处青藏高原边缘复杂地形区,不同模式对地形的处理方式(如地形高度、坡度、方位角等)可能引起模式对地形响应的差异,进而会导致降水预报的不同偏差。目前,正在分析中尺度模式偏差的时空差异成因,并尝试物理成因探讨,但受文章篇幅的限制,该内容将在后面的研究中进一步补充。

参考文献(References):

[1] 赵宁坤, 张秀年, 孙俊奎, 等. 高分辨率区域模式降水预报在云南的检验[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(1): 78-86. [Zhao Ningkun, Zhang Xiunian, Sun Junkui, et al. Verifications of high-resolution regional numerical model precipitation forecast in Yunnan Province[J]. Torrential Rain and Disasters, 2021, 40(1): 78-86.]

[2] 王基鑫, 黎倩, 栗晗, 等. WQSRTP方法在甘肃省高低温客观预报中的应用[J]. 干旱区研究, 2023, 40(7): 1052-1064. [Wang Jixin, Li Qian, Li Han, et al. Application of WQSRTP method in objective forecast of high and low temperature in Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(7): 1052-1064.]

[3] 韩晶, 路亚奇, 曹彦超, 等. 基于空间检验技术的甘肃河东地区短时暴雨预报产品误差分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2023, 17(1): 83-89. [Han Jing, Lu Yaqi, Cao Yanchao, et al. Error analysis of short-term rainstorm forecast product based on spatial test technology in Hedong area of Gansu[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2023, 17(1): 83-89.]

[4] 孔祥伟, 李晨蕊, 陈晓燕, 等. 甘肃河东地区基于Himawari 8卫星多通道数据的降水反演[J]. 气象研究与应用, 2020, 41(3): 54-60. [Kong Xiangwei, Li Chenrui, Chen Xiaoyan, et al. Precipitation retrieval based on multi-channel data of Himawari 8 satellite in Hedong area of Gansu Province[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020, 41(3): 54-60.]

[5] 裴惠娟, 陈晋, 李雯, 等. 甘肃省暴雨洪水时空分布及风险评估[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(3): 167-175. [Pei Huijuan, Chen Jin, Li Wen, et al. Spatiotemporal pattern and risk assessment of storm flood in Gansu Province[J]. Journal of Nature Disasters, 2017, 26(3): 167-175.]

[6] 孟丽霞, 许东蓓, 狄潇泓, 等. 甘肃省短时强降水的时空特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(6): 34-39. [Meng Lixia, Xu Dongbei, Di Xiaohong, et al. The spatial and temporal distribution characteristics of short-duration heavy rainfall in Gansu Province[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2017, 11(6): 34-39.]

[7] 苏军锋, 张锋, 黄玉霞, 等. 甘肃陇南市短时强降水时空分布特征及中尺度分析[J]. 干旱气象, 2021, 39(6): 966-973. [Su Junfeng, Zhang Feng, Huang Yuxia, et al. Spatial-temporal distribution characteristics and mesoscale analysis of short-time heavy precipitation in Longnan of Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(6): 966-973.]

[8] 郑新, 宋媛, 崔宇. 近40年甘肃地区小时强降水时空分布特征分析[J]. 甘肃科技, 2022, 38(7): 72-77. [Zheng Xin, Song Yuan, Cui Yu. Analysis of the spatial and temporal distribution characteristics of hourly heavy precipitation in Gansu over the past 40 years[J]. Gansu Science and Technology, 2022, 38(7): 72-77.]

[9] 周子涵, 王基鑫, 刘维成, 等. 甘肃省暖季降水日变化特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(1): 1-12. [Zhou Zihan, Wang Jixin, Liu Weicheng, et al. Diurnal variation characteristics of warm season precipitation in Gansu Province[J]. Arid Zone Research, 2024, 41(1): 1-12.]

[10] 李亮亮. 中国西北复杂地形区降水精细化特征分析[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2021. [Li Liangliang. Fine-scale Analysis of Hourly Precipitation over the Complex Topographies in Northwest China[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2021.]

[11] 宇如聪, 李建, 陈昊明, 等. 中国大陆降水日变化研究进展[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 948-968. [Yu Rucong, Li Jian, Chen Haoming, et al. Progress in studies of the precipitation diurnal variation over contiguous China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 948-968.]

[12] Ramage C S. Diurnal variation of summer rainfall over East China, Korea and Japan[J]. Journal of Meteorology, 1952, 9(2): 83-86.

[13] 蒋慧敏, 刘春云, 贾健, 等. 新疆夏季对流性降水时空分布特征及成因分析[J]. 高原气象, 2019, 38(2): 340-348. [Jiang Huimin, Liu Chunyun, Jia Jian, et al. The temporal and spatial characteristics of convective precipitation in Xinjiang among the summer and causes analysis[J]. Plateau Meteorology, 2019, 38(2): 340-348.]

[14] Slingo A, Hodges K I, Robinson G J. Simulation of the diurnal cycle in a climate model and its evaluation using data from Meteosat 7[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2004, 130(599): 1449-1467.

[15] 钟琦, 孙卓, 陈昊明, 等. 京津冀强降水日变化的多模式预报偏差及成因分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(9): 1831-1848. [Zhong Qi, Sun Zhuo, Chen Haoming, et al. Multi model forecast biases of the diurnal variations of intense rainfall in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Science China Earth Sciences, 2022, 52(9): 1831-1848.]

[16] 张宏芳, 潘留杰, 陈昊明, 等. 秦岭及周边地区暖季降水日变化及其成因分析[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 935-946. [Zhang Hongfang, Pan Liujie, Chen Haoming, et al. Diurnal variations and causes of warm season precipitation in Qinling and surrounding areas[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 935-946.]

[17] 甘玉婷, 陈昊明, 李建. 千米尺度数值预报模式对泰山地区暖季降水预报性能的评估[J].气象学报, 2021, 79(5): 750-768. [Gan Yuting, Chen Haoming, Li Jian. Evaluation of the performance of kilometer scale numerical operation forecast model for warm season precipitation forecasting in Taishan region[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(5): 750-768.]

[18] 叶茂, 吴钲, 游婷, 等. CMA-SH9在川渝地区的降水日变化预报效果评估[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(2): 56-62. [Ye Mao, Wu Zheng, You Ting, et al. Evaluation of diurnal precipitation variation forecasts with CMA-SH9 over Sichuan-Chongqing region[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2022, 42(2): 56-62.]

[19] 孔祥伟, 张君霞, 杨晓军, 等. 西北地区东部强降水大尺度数值模式预报空间偏差分析[J]. 高原气象, 2022, 41(5): 1109-1123. [Kong Xiangwei, Zhang Junxia, Yang Xiaojun, et al. Spatial deviation analysis of heavy precipitation forcast of large scale numerical weather prediction in eastern Northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(5): 1109-1123.]

[20] 吴晶, 李照荣, 颜鹏程, 等. 西北四省(区)GRAPES模式降水预报的定量评估[J]. 气象, 2020, 46(3): 346-356. [Wu Jing, Li Zhaorong, Yan Pengcheng, et al. Quantitative assessment of GRAPES rainfall forecast for four provinces of Northwest China[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(3): 346-356.]

[21] 陈晓燕, 孔祥伟, 彭筱, 等. 全球和区域数值模式在甘肃2020年汛期降水预报中的检验评估[J]. 干旱气象, 2022, 40(3): 524-535. [Chen Xiaoyan, Kong Xiangwei, Peng Xiao, et al. Verification and assessment of precipitation forecast based on global and regional numerical models in Gansu in flood season of 2020[J]. Journal of Arid Meteorology, 2022, 40(3): 524-535.]

[22] Lange M. On the uncertainty of wind power predictions-Analysis of the forecast accuracy and statistical distribution of errors[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127(2): 177-184.

[23] Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. Moisture transport in the Asian summer monsoon region and its relationship with summer precipitation in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2010, 24(1): 31-42.

[24] 谭政华, 陆忠艳, 林海峰, 等. 2020年辽宁省汛期多模式降水预报评估[J]. 气象与环境学报, 2023, 39(1): 10-16. [Tan Zhenghua, Lu Zhongyan, Lin Haifeng, et al. Verification for precipitation forecasted by NWP models in Liaoning Province during the summer of 2020[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2023, 39(1): 10-16.]

Refined assessment of precipitation prediction deviation in stormy days using two mesoscale models in the Hedong Region, Gansu Province

YANG Xiumei, KONG Xiangwei, SHA Hong'e, ZHANG Junxia
(Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, Gansu, China)

Abstract: In this study, we assess the characteristic bias in the diurnal precipitation forecasts from two models—CMA-SH9 and CMA-MESO—for hourly precipitation forecasts across four subregions in the Hedong Region of Gansu Province (the Gannan Plateau and the Longnan, Longdong, and Longzhong regions). These forecasts were assessed based on rainfall amount and frequency, using observed hourly precipitation data from 20 storm rainy days between May and September 2019−2021 in the same region. The results show the following: (1) Both models have similar forecasting abilities for precipitation amounts of ⩾2.5 mm·h^{-1} and ⩾5 mm·h^{-1} in the Gannan Plateau and the Longnan and Longdong regions. However, the CMA-MESO model facilitates easier precipitation forecasts of ⩾5 mm·h^{-1} in the Longzhong region than the CMA-SH9 model. (2) For rainfall ⩾2.5 mm·h^{-1}, both models overestimate intensity during the day and underestimate it at night compared to observations, with significant deviations mostly occurring around the peak time of observed rainfall at night. The CMA-SH9 model generally outperforms the CMA-MESO model in predicting rainfall intensity in the Longzhong and Longdong regions most times of the day. In the Longnan region, the CMA-SH9 model performs better than the CMA-MESO model in predicting rainfall intensity at night but performs worse during the day. For rainfall ⩾5 mm·h^{-1}, the CMA-SH9 model consistently predicts rainfall intensity better than the CMA-MESO model in the Longnan and Longdong regions, but worse in the Gannan Plateau, most of the time. (3) For rainfall ⩾2.5 mm·h^{-1}, both models predict higher rainfall frequency during the day and lower frequency at night compared to observations, with significant deviations mostly occurring around the peak time of observed rainfall at night. The CMA-SH9 model mostly outperforms the CMA-MESO model in predicting rainfall frequency. For rainfall ⩾5 mm·h^{-1}, both models underestimate rainfall frequency compared to observations in the Longnan, Longzhong, and Longdong regions, with the negative forecast deviation more pronounced around the peak time of observed rainfall at night. (4) Phase error are predominant across the four subregions for both models, while amplitude error was minimal.

Keywords: hourly rainfall; diurnal variation; rainfall intensity and frequency; forecast deviation